



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8907>

To cite this version :

Delphine DARE, Valérie LABAT, Rozenn DESMARE - Initiation à la détection d'objets en acoustique sous-marine - In: 8ème Colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, France, 2010-03 - CETSIS 2010 - 2010

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Initiation à la détection d'objets en acoustique sous-marine

Delphine Daré - Emzivat, Valérie Labat, Rozenn Desmare

delphine.dare@ecole-navale.fr, valerie.labat@ecole-navale.fr, rozenn.desmare@ecole-navale.fr.

Ecole Navale / Irenav - EA 3634, BCRM Brest, CC 600, 29240 Brest Cedex 9, France.

RESUME : Nous présentons dans cet article l'approche expérimentale mise en oeuvre au sein du département Signal et Acoustique de l'Ecole Navale pour l'enseignement pratique de l'acoustique sous marine aux élèves officiers. Il s'agit de sensibiliser les élèves aux problèmes spécifiques qu'ils pourront rencontrer dans leur futur métier et plus particulièrement avec les systèmes sonar. Pour ce faire, nous avons développé une série de travaux pratiques qui illustrent les cours d'acoustique, de sonar et de traitement du signal. Nous présentons l'un de ces TP qui porte sur la détection d'objets. Les objectifs de ce TP sont d'une part, de comprendre le principe de détection et localisation de cibles et d'autre part, d'étudier la résolution spatiale d'un système de détection. Les élèves exploitent des séries de signaux temporels obtenus après insonification par un transducteur ultrasonore de cibles sphériques de taille différente. Les données acquises pour différentes fréquences permettent de visualiser concrètement l'influence de la résolution à la fois sur les signaux temporels et sur l'image résultante. Enfin, nous leur présentons le traitement SAS (Sonar à Antenne Synthétique) qui améliore la résolution du système de détection

Mots clés : acoustique sous marine, traitement du signal, écho, résolution, sonar à antenne synthétique.

1 INTRODUCTION

Les élèves de l'Ecole Navale suivent une formation scientifique généraliste et pluridisciplinaire dont les thématiques sont liées aux préoccupations de la Marine Nationale. L'un des domaines enseignés concerne l'acoustique sous-marine. Cette formation est dispensée à la fois sous une forme académique (cours, travaux dirigés, conférences) mais également sous une forme pratique (projets internes et externes à l'Ecole, travaux pratiques). C'est justement une séance de travaux pratiques mise en place dans la thématique acoustique sous-marine que nous proposons d'exposer.

Nous avons développé une série de trois TP progressifs de 3 heures chacun pour illustrer les cours d'acoustique sous-marine, de traitement du signal et de sonar :

- le premier assez classique porte sur le rayonnement d'un transducteur ultrasonore avec la mesure de la directivité et l'influence de la fréquence sur celle-ci;
- le deuxième porte sur l'analyse des échos de cible pour des objets de géométrie, dimensions et matériau différents;
- le dernier porte sur la détection et la localisation d'objets.

Cet article présente le dernier TP, aboutissement des TP précédents qui portent principalement sur les aspects acoustiques. Au cours de la séance, les élèves exploitent des séries de signaux temporels. Ceux-ci sont obtenus après insonification, pour plusieurs fréquences, d'un fantôme contenant quatre cibles sphériques de taille différente. Les conclusions tirées du TP précédent sur les échos de cible leur permettent dans un

premier temps de localiser les cibles présentes dans le fantôme. Puis, ils comparent les signaux et images des objets obtenus à des fréquences différentes. Ils visualisent concrètement l'influence de la résolution (et de la directivité du transducteur) sur les signaux temporels et sur les images. Nous leur présentons alors le principe du sonar à antenne synthétique qui a pour finalité d'améliorer la résolution des images sonar.

La première partie de ce document expose le contexte de l'étude. La deuxième rappelle la théorie (acoustique et signal) nécessaire pour une bonne compréhension de la partie expérimentale. Puis, le dispositif expérimental, les mesures réalisées et leur exploitation y sont présentés.

2 CONTEXTE

En raison de leur faible atténuation dans l'eau (par rapport aux ondes électromagnétiques), les ondes acoustiques sont largement utilisées pour l'étude et la caractérisation du milieu marin [1]. La gamme de fréquences varie de quelques kHz à quelques centaines de kHz.

Le terme de SONAR pour SOund Navigation And Ranging désigne l'ensemble des systèmes de détection/localisation pour tout élément immergé utilisant des ondes acoustiques. On distingue deux grands types de systèmes SONAR : le système actif et le système passif. Le premier émet une onde acoustique et réalise sa détection à partir de l'onde rétrodiffusée par l'espace environnant (cibles, sous-marins, bancs de poissons, fond...). Le système passif quant à lui se contente d'«écouter», c'est à dire qu'il cherche à détecter les bruits rayonnés par les éventuelles cibles.

Suivant l'application considérée, le traitement de l'information se fait à partir du signal ou de l'image sonar. La constitution d'une image sonar repose sur la juxtaposition de lignes, chaque ligne correspondant à un signal rétrodiffusé pour une position donnée du système. Les amplitudes de ces différents signaux sont traduites en niveaux de gris.

La notion de résolution constitue un des facteurs importants pour un système de détection. Ce TP se propose d'observer l'impact de ce paramètre. Pour cela, l'étude est réalisée en cuve à échelle réduite dans une configuration sonar actif.

3 APPROCHE THEORIQUE

3.1 Directivité

La directivité du transducteur exprime, en champ lointain, la distribution angulaire de l'énergie acoustique émise par celui-ci à une fréquence donnée f . On montre que la fonction de directivité correspond à la transformée de Fourier de l'ouverture du transducteur. Elle dépend donc de la géométrie du transducteur [1]. Dans le cas d'un piston circulaire plan de rayon a , la fonction de directivité est [2]:

$$D(\theta) = \left| \frac{2 J_1(v)}{v} \right|, \quad (1)$$

où J_1 représente la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1, et $v = ka \sin \theta$ avec k le nombre d'onde.

La figure 1 montre l'évolution de la fonction de directivité du piston circulaire plan. Elle présente un maximum dans l'axe du transducteur, puis décroît jusqu'à devenir nulle lorsque v (*i.e.* l'angle θ) augmente. Le rayonnement présente donc un lobe principal qui est caractérisé par son ouverture angulaire à -3dB notée $2\theta_3$. Autour de ce lobe principal, il existe des lobes secondaires qui peuvent être à l'origine d'erreur d'interprétation dans la détection.

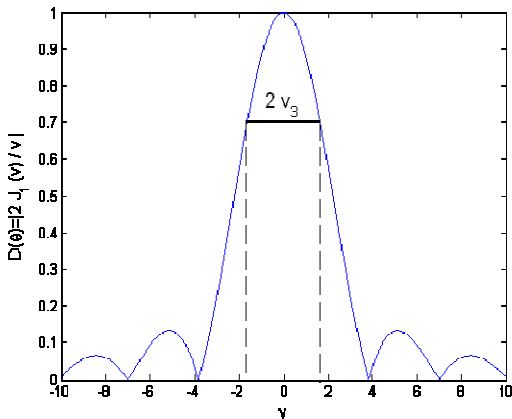


fig 1 : Représentation de la fonction de directivité du piston circulaire plan de rayon a en fonction de $v = ka \sin \theta$.

La largeur du lobe principal de la fonction de directivité intervient pour une valeur $2v_3 \approx 3.2$, ce qui donne (avec l'approximation d'angles petits) une ouverture angulaire du faisceau $2\theta_3$:

$$2\theta_3 \approx 2 \sin \theta_3 = \frac{\lambda}{2a}, \quad (2)$$

où λ est la longueur d'onde.

Un transducteur de rayon a sera donc d'autant plus directif (lobe principal étroit) que sa fréquence sera élevée.

L'ouverture angulaire du faisceau fixe la résolution angulaire du système de détection.

3.2 Résolution spatiale

La résolution spatiale d'un système est sa capacité à séparer deux cibles distinctes placées à proximité l'une de l'autre. La résolution est donc la distance minimale qui sépare deux objets pour qu'ils soient discernables l'un de l'autre. Il existe deux sortes de résolutions spatiales comme l'indique la figure 2 :

- **la résolution latérale** (ou longitudinale) d_l qui est l'aptitude à différencier deux cibles ponctuelles dans le sens de déplacement du transducteur (*i.e.* dans une direction perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde);
- **la résolution axiale** d_a qui caractérise l'aptitude à différencier deux cibles ponctuelles situées dans l'axe de propagation de l'onde acoustique.

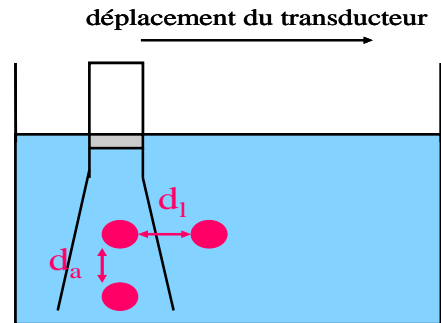


fig 2 : Résolutions latérale d_l et axiale d_a d'un transducteur.

3.2.1 Résolution latérale

Considérons deux cibles ponctuelles placées à une profondeur z dans le sens de déplacement du transducteur. La résolution latérale d_l est la distance minimale séparant ces deux objets ponctuels. Elle correspond à la largeur du faisceau acoustique à la profondeur z où sont situés les objets (figure 3).

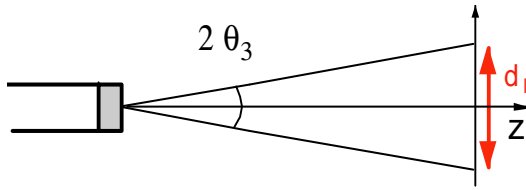


fig 3 : Résolution latérale d_l d'un transducteur.

La résolution latérale d_l s'écrit donc (sous l'hypothèse d'angles petits) :

$$d_l = 2 z \tan \theta_3 \approx 2 z \theta_3. \quad (3)$$

Elle dépend donc de l'ouverture angulaire et de la profondeur à laquelle se trouvent les cibles.

3.2.2 Résolution axiale

Considérons à présent que les deux cibles ponctuelles sont placées dans l'axe de propagation de l'onde acoustique (figure 4). La résolution axiale d_a est la distance minimale séparant ces deux objets ponctuels. Elle dépend de la durée τ de l'écho.

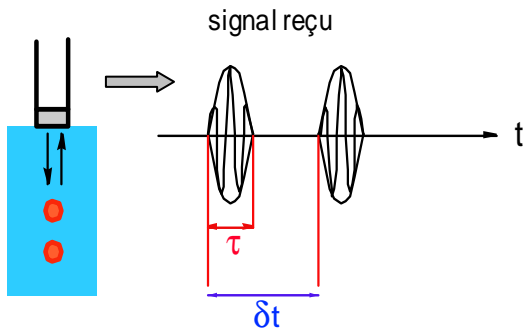


fig 4 : Principe d'obtention de la résolution axiale d_a d'un transducteur.

En effet, après insonification par une onde acoustique incidente, chacune de ces cibles renvoie un écho en direction du transducteur, comme le montre la figure 4. Pour détecter distinctement les deux cibles, il faut que leurs échos soient dissociés. Dans le cas contraire, s'il y a chevauchement des deux échos, les cibles ne sont pas séparées. Il suffit donc que l'intervalle de temps δt séparant les deux échos soit supérieur à la durée τ de l'impulsion :

$$\delta t \geq \tau \Leftrightarrow \frac{2d}{c} \geq \tau.$$

De cette condition sur les signaux reçus, on déduit la résolution axiale d_a séparant les deux cibles :

$$d_a = \frac{c \tau}{2} \quad (4)$$

La résolution axiale du transducteur ne dépend donc que de la durée temporelle du signal émis.

Dans le cadre de ce TP, les élèves s'intéressent uniquement à la résolution latérale.

3.3 Antenne synthétique

Pour compléter la séance, il nous a paru judicieux d'y associer une approche traitement du signal (enseignement largement dispensé dans leur formation) en mettant en œuvre une méthode d'antenne synthétique (ou synthèse d'ouverture).

Les images obtenues par un sonar latéral présentent une résolution latérale donnée par :

$$\delta = R_0 \cdot \frac{\lambda}{L_r}, \quad (5)$$

avec λ la longueur d'onde, L_r la longueur réelle du récepteur et R_0 la distance minimale entre la cible et l'antenne.

Ainsi l'obtention d'une bonne résolution latérale est garantie à condition :

- que la longueur d'onde d'émission soit la plus petite possible c'est-à-dire une fréquence élevée d'où une limitation de la portée (distance maximale d'observation);
- d'utiliser des antennes de grande dimension mais cela a un coût et un encombrement important.

Pour améliorer cette résolution, l'approche « antenne synthétique » [3] peut être mise en œuvre. Il s'agit de réaliser une antenne « fictive » de grande dimension. Cette technique réalise une correction du retard des différents signaux réfléchis avant de procéder à une focalisation.

L'élément de réception considéré reçoit un certain nombre de signaux à différents instants au lieu d'avoir plusieurs capteurs fixes qui reçoivent un seul signal au même moment. Il est clair que la modélisation adoptée repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices comme une trajectoire rectiligne du capteur, des cibles ponctuelles omnidirectionnelles et une scène observée invariante tout le temps de l'acquisition.

Ainsi, un objet enfoui ou non dans le sédiment sera vu par l'élément d'antenne pendant plusieurs tirs sonar (voir figure 5). L'écho de cet objet est reçu par le capteur après un temps 't' correspondant au trajet aller-retour de l'onde insonifiant l'objet et revenant au capteur.

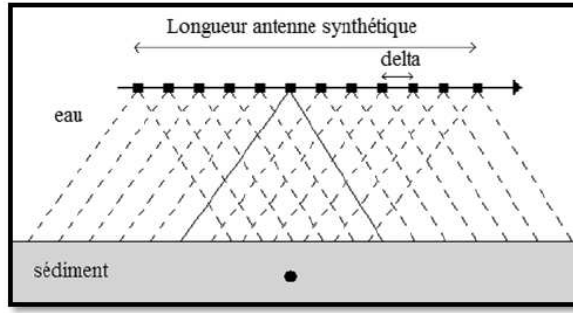


fig 5 : Schéma de principe du traitement d'antenne synthétique [3].

L'ensemble des temps d'arrivée varie de façon quadratique en fonction de la distance cible-récepteur : c'est l'équation d'une hyperbole dont le sommet correspond à la distance minimale antenne/cible.

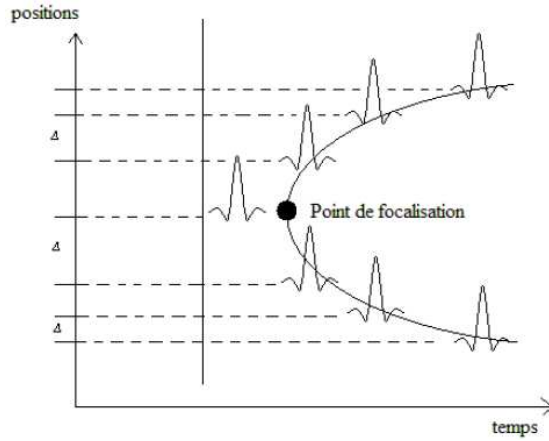


fig 6 : Principe de la synthèse d'ouverture dans le domaine temporel [3].

Pour une position donnée, l'évolution temporelle du signal peut être observée avec une période d'échantillonnage $T_e = 1/F_e$.

Il est possible de venir former une matrice 2D où tous les signaux reçus sont juxtaposés. Les données sont organisées de telle façon que la matrice va comporter 'n' colonnes correspondant aux 'n' positions successives du capteur et 'm' lignes correspondant aux 'm' échantillons composant le signal temporel enregistré pour une position donnée. Une image brute des données peut ainsi être formée qui permet de constater que la cible n'est pas représentée par un point mais par une hyperbole (cf figure 9) dont le centre donne la position de la cible vis-à-vis de l'antenne.

Une compensation des retards est effectuée afin de les ramener à un retard équivalent à celui du point de focalisation (futur sommet de l'hyperbole) ce qui se traduit matriciellement par un déplacement des données. La longueur de l'antenne synthétique L_{SA} s'exprime par [3] :

$$L_{SA} = N_c \Delta = 2R_0 \tan(2\theta_3 / 2), \quad (6)$$

où Δ est la distance entre deux positions successives du capteur vérifiant la fréquence d'échantillonnage spatiale et N_c le nombre de tirs sonar.

Afin de compenser les retards, la différence de chemin est traduite en terme de décalage d'échantillons au sein de la matrice. Puis la focalisation est appliquée. Cela consiste à supposer que chaque échantillon temporel pour une position donnée (soit un point donné de la matrice) est le sommet d'une hyperbole. Les amplitudes des échantillons situés de part et d'autre de ce point sont considérées pour donner une nouvelle amplitude au point de focalisation (moyennage de toutes ces amplitudes). Ainsi, cette opération va accentuer l'amplitude du signal supposé renvoyé par un point-cible candidat contrairement à un point-bruit (puisque le bruit va différer d'un tir à l'autre) d'où une moins bonne visualisation sur l'image traitée. Dans notre cas, la zone étudiée est observée via un transducteur déplacé le long d'un rail rectiligne (cf figure 7).

4 DESCRIPTION DE LA MANIPULATION

4.1 Dispositif expérimental

L'émetteur/récepteur (*Panametrics 5072 PR*) délivre un signal impulsionnel large bande (35MHz) qui excite un transducteur ultrasonore (*Panametrics A306R ou A303R*) immergé dans une cuve remplie d'eau. L'onde acoustique rétrodiffusée par les objets est perçue par le même transducteur. Le signal est alors pré-amplifié (gain variable en réception) puis visualisé sur un oscilloscope relié à un ordinateur pour l'acquisition et le traitement.

Quatre cibles sphériques de diamètre différent (de 5 à 16 mm) ont été emprisonnées dans un bloc de gélatine pour caractériser uniquement les signaux issus des cibles et s'affranchir de l'influence de l'écho de fond. Elles sont supposées alignées et distantes d'environ 1.5 cm.

Le transducteur ultrasonore est fixé sur un système de positionnement et de déplacement manuel. Les mesures sont réalisées en déplaçant le transducteur sur le rail par pas régulier de 1 mm sur une distance de 12 cm (correspondant à la longueur du bloc de gélatine).

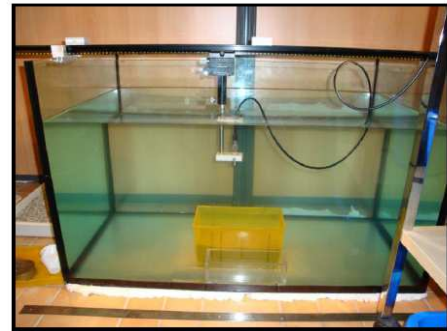


fig 7 : Dispositif expérimental

Plusieurs séries de mesures ont été réalisées et ont montré la répétabilité des résultats obtenus. Les élèves travaillent sur deux jeux de données préalablement réalisées par les enseignants aux fréquences 2.25 et 1 MHz. L'exploitation de ces mesures s'effectue à l'aide du logiciel Matlab®.

4.2 Pré-requis obtenus avec les TP précédents

Dans le premier TP acoustique sur le rayonnement des transducteurs, les élèves mesurent entre autres, la directivité de transducteurs (figure 8). Ils obtiennent alors leur ouverture angulaire $2\theta_3$: 6.6° à 1 MHz et 2.8° à 2.25 MHz.

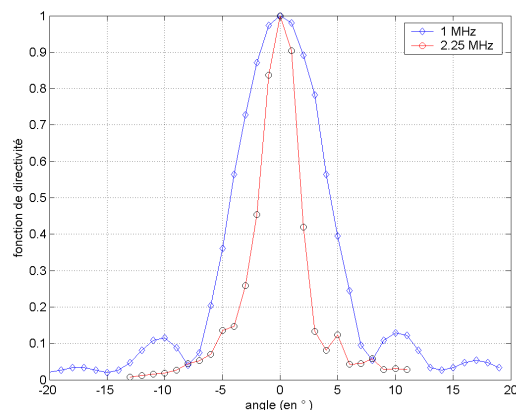


fig 8 : Directivité mesurée pour les transducteurs à 1 et 2.25 MHz.

Dans le TP sur les échos de cibles, les élèves analysent les signaux temporels rétrodiffusés par différentes cibles. La figure 9 montre le signal rétrodiffusé par une cible sphérique en acier de 5 mm de diamètre. Il est constitué d'un écho principal (écho spéculaire) et de plusieurs échos secondaires correspondant essentiellement à des ondes de surface. Pour des cibles sphériques de diamètre plus élevé, on note une augmentation de l'amplitude de l'écho spéculaire et du décalage temporel entre celui-ci et les échos secondaires.

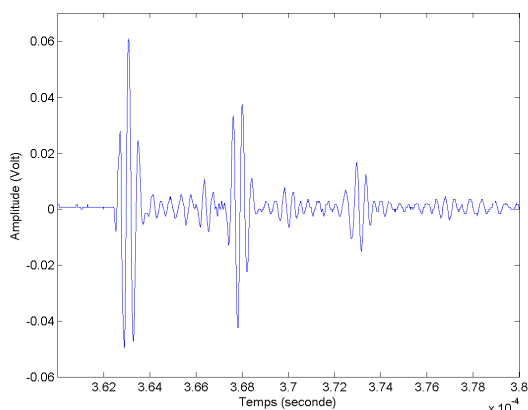


fig 9 : Exemple de signal rétrodiffusé par une cible sphérique de diamètre 5 mm.

4.3 Exploitation des résultats

Dans un premier temps, les élèves utilisent leurs résultats du TP sur les échos de cibles et exploitent les signaux temporels pour identifier et localiser les différentes cibles dans le bloc à la fréquence de 2.25 MHz : distance de la cible par rapport au transducteur, position dans le bloc de gélatine, taille de la cible ...

En préparation à la séance, les élèves calculent les résolutions latérales obtenues pour les fréquences considérées à différentes profondeurs (tableau 1).

| | 1 MHz | 2.25 MHz |
|-------------|--------|----------|
| $z = 25$ cm | 2.9 cm | 1.2 cm |
| $z = 30$ cm | 3.5 cm | 1.5 cm |

tab 1 : Exemples de résolution latérale obtenus.

A la lecture du tableau et au vu de la distance entre les cibles (~ 1.5 cm), les élèves ont conscience que la résolution ne sera pas satisfaisante pour le jeu de données à 1 MHz. Ceci est confirmé par l'exploitation des signaux temporels et de l'image obtenue. Nous leur proposons d'appliquer le traitement SAS, technique intégrée sur les nouveaux dispositifs acoustiques équipant les futures fréquences de la Marine Nationale.

4.3.1 Les signaux temporels

La figure 10 présente des signaux temporels obtenus à la même position du transducteur pour 2.25 MHz et 1 MHz. Les échos spéculaires apparaissent distinctement pour chacune des cibles à 2.25 MHz. En revanche, pour 1 MHz, le faisceau acoustique étant moins directif, il y a interférence entre les échos spéculaires de cibles proches. Les élèves visualisent donc concrètement sur les signaux temporels l'importance de la directivité dans un contexte de détection.

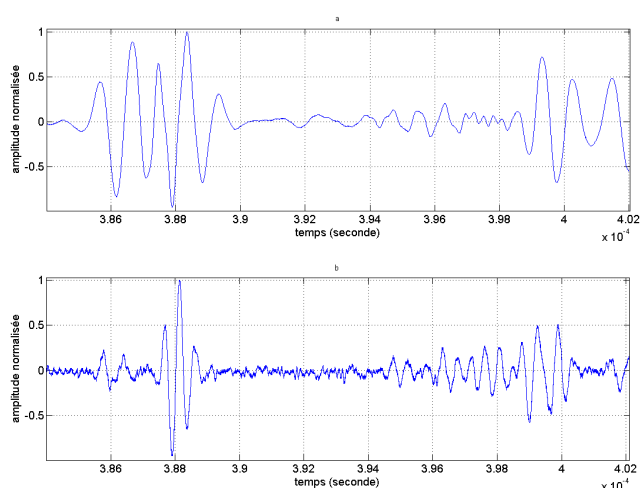


fig 10 : Exemple de signaux temporels obtenus pour 1 (haut) et 2.25 (bas) MHz.

4.3.2 Sur une image

Les élèves analysent ensuite l'image obtenue avec l'ensemble des signaux temporels enregistrés sur toute la longueur du bloc pour les fréquences de 1 et 2.25 MHz (figure 11).

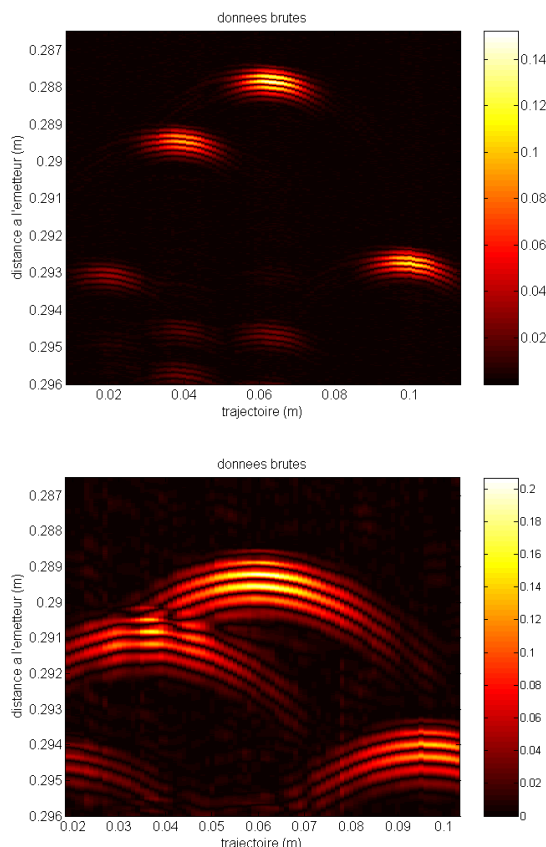


fig 11 : Images obtenues à partir des données brutes pour la fréquence de 2.25 MHz (haut) et 1 MHz (bas).

Ils retrouvent sur ces images brutes les traces hyperboliques des quatre sphères. Conformément avec les résultats du tableau 1, les cibles sont bien dissociées à la fréquence de 2.25 MHz, contrairement au cas à 1 MHz (chevauchement des traces).

4.3.3 Apport du traitement SAS

Afin d'améliorer l'image obtenue à partir des données à 1MHz (cas de la moins bonne résolution), les élèves appliquent le traitement SAS sur ces données brutes. L'image résultante (figure 12) est de meilleure qualité. La forme hyperbolique est nettement atténuée et laisse place à une empreinte plus condensée. Les cibles sont reconnaissables plus distinctement à 1 MHz.

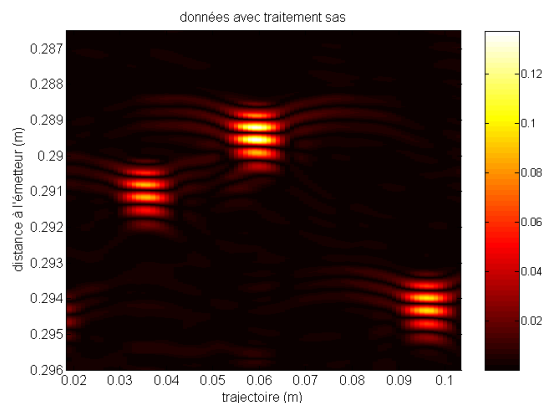


fig 12 : Image obtenue après traitement SAS pour la fréquence de 1 MHz.

5 CONCLUSION

Cet article présente une séance de TP mise en place à l'Ecole Navale au profit des élèves aspirants. L'objectif visé est de consolider les connaissances théoriques (acoustique et signal) acquises par les élèves au cours de séances académiques en leur proposant une approche expérimentale en lien avec leur futur métier.

L'appréciation des élèves sur cette séance de TP est positive : illustration concrète des notions de résolution des systèmes de détection à la fois sur des signaux réels et sur des images, travail sur le SAS pour augmenter la résolution.

La configuration retenue est simplifiée par rapport au cas réel. Pour être plus réaliste, il faudrait considérer des objets posés sur le fond (voire enfouis) d'où une information reçue plus riche, un environnement plus bruité, une inclinaison du faisceau incident.

Ce TP est orienté vers l'acoustique sous-marine et ses applications, mais peut également se généraliser à d'autres domaines comme le contrôle non destructif par exemple.

Bibliographie

- [1] X.Lurton, « An Introduction to Underwater Acoustics : Principles and Applications », Springer, 2002 .
- [2] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, « Fundamentals of Acoustics », 3rd edition, 1982 .
- [3] Châtillon Jacques, « Application de la synthèse d'ouverture en sonar actif », Thèse de doctorat, Lyon - France, septembre 1994.